

О. Ю. Сидоров

Нижнетагильский технологический институт (филиал) ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» (г. Нижний Тагил, Россия)

Ф. Н. Сарапулов, Б. А. Сокунов, С. Ф. Сарапулов

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» (г. Екатеринбург, Россия)

УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО РАСПЛАВА ПРИ ЕГО КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В БЕГУЩЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Применение бесконтактного электромагнитного воздействия на кристаллизующийся металлический расплав позволяет получить металлическую заготовку с повышенными механическими характеристиками. Это выражается в измельчении зерна, выравнивании химического состава по объему слитка.

В исследовании ставится задача установить взаимосвязь между структурой слитка и особенностями кристаллизации жидкого сплава в бегущем магнитном поле. В качестве объекта изучения рассмотрен электромагнитный кристаллизатор для литья латуни Л 63 в виде цилиндрической заготовки диаметром 163 мм [1].

Модельные вычисления включали следующие этапы [2–4]:

- расчет электромагнитного, гидродинамического и температурного полей;
- получение картины кристаллизации в динамике;
- установление взаимосвязи между градиентом температуры и величиной зерна слитка.

Фрагмент расчетной области показан на рис. 1. Область жидкого расплава была разделена на 10 слоев по оси r (горизонтальная ось) и на 56 слоев по оси z .

Результаты расчетов показали, что поле скоростей достигает установившегося режима примерно через 2 секунды после начала движения. Структура течения носит двухвихревой характер (рис. 2) с максимальными скоростями на оси симметрии ($r = 0$), которые составляют на середине высоты около 0,74 м/с. В слое расплава максимально приближенного к индуктору скорость на середине высоты кристаллизатора составляют около 0,38 м/с.

Начальная температура расплава выбрана равной 1090 К, кристаллизация начинается при 1083 К и заканчивается при 1070 К. Были созданы условия торможения теплообмена в верхней и нижней частях металлического расплава с целью обеспечения сходным экспериментальным.

Кристаллизация расплава начинается примерно через 100 с после начала вычислений. Первые кристаллы появляются в слое металла наиболее близком к индуктору (слой 10 по горизонтальной оси при подсчете слева направо, рис. 1). В этом слое имеет место наибольший градиент температуры из всех областей с жидким металлом.

Фронт кристаллизации движется от слоев металла наиболее близких к индуктору в направлении оси слитка со скоростью интервале 3–5 мм/мин в первые 5–25 мин.

В работе [5] отмечается, что рост кристаллов происходит в направлении, противоположном направлению теплового потока, который, в свою очередь, определяется градиентом температурного поля. В связи с этим попытаемся установить взаимосвязь между градиентом температурного поля при кристаллизации и структурой твердого металлического сплава.

Рассмотрим сечение, находящееся на середине высоты по оси z . В этой области доминирует r -компонента градиента температурного поля $\partial T / \partial r$. Расчетные дан-

ные зависимости « $\partial T/\partial r - n$ » (n – номер слоя по оси r) для различных моментов времени показаны на рис. 3.

Следует отметить, что наибольший температурный градиент наблюдается в области наиболее приближенной к внешнему краю слитка. Компонента градиента $\partial T/\partial r$ увеличивалась с начального момента времени до момента времени ≈ 22 мин, что связано с увеличением скорости появления твердой фазы в расплаве (см. рис. 3) и выделяющейся при этом теплоты кристаллизации. Дальнейшее увеличение доли твердой фазы происходит с меньшей скоростью (см. рис. 3), что уменьшает температурный градиент за счет меньшего количества выделяющейся теплоты кристаллизации.

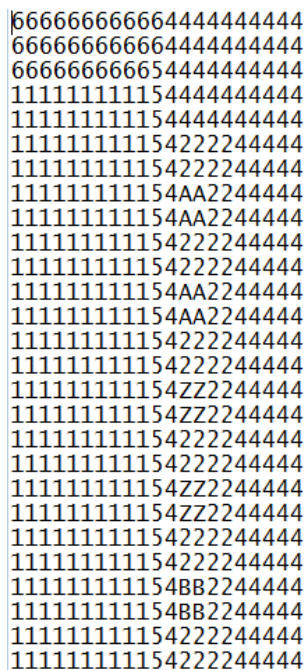


Рис. 1. Фрагмент расчетной области:
1 – металлический расплав;
2 – магнитопровод; A, Z, B, X – обмотка индуктора; 4 – воздух; 5 – изложница; 6 – теплоизолятор

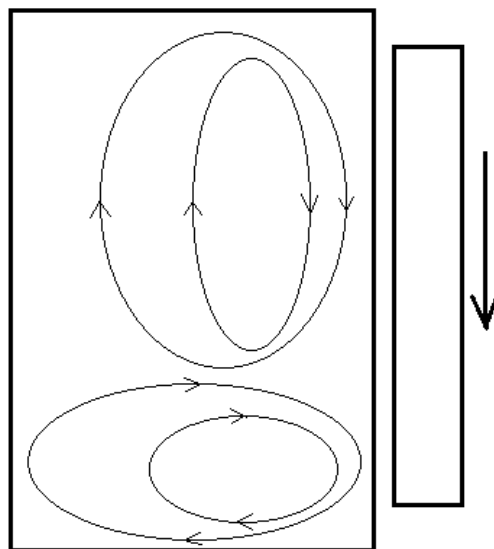


Рис. 2. Схематичное изображение результатов вычислений движения металлического расплава: жирной стрелкой показано направление бегущего магнитного поля

Для количества расчетных шагов 540 (≈ 25 мин) доля твердой фазы в каждой клетке расчетной области превышает 0,75. В этом случае проведем сопоставление экспериментально наблюдаемой структуры (рис. 4) металлического слитка и компоненты температурного градиента $\partial T/\partial r$ (рис. 3, кривая 540). Во внешнем слое толщиной $\approx 1/10$ от радиуса слитка наблюдается равноосная мелкозернистая структура. Во внутреннем слое (от центра к периферии) толщиной $\approx 5/10$ от радиуса слитка наблюдаются равноосные крупные кристаллы. Между этими слоями ($\approx 4/10$ от радиуса слитка) наблюдаются столбчатые кристаллы, направленные по радиусу.

Количественно взаимосвязь между градиентом температурного поля при кристаллизации и структурой слитка можно выразить в следующих правилах:

- $|\partial T/\partial r| > 600$ – равноосная мелкозернистая структура;
- $300 \leq |\partial T/\partial r| \leq 600$ – зона столбчатых кристаллов;
- $|\partial T/\partial r| < 300$ – образование крупных равноосных кристаллов.

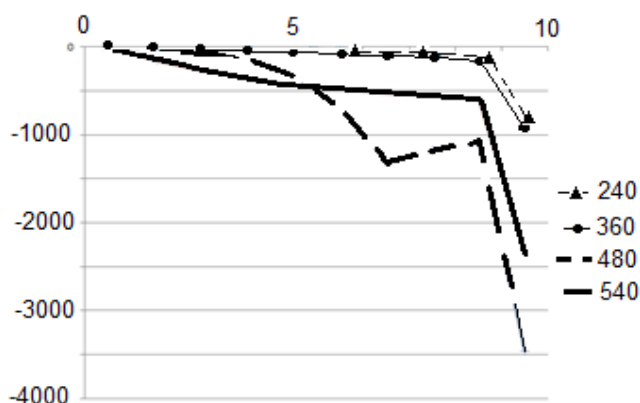


Рис. 3. Зависимость « $\frac{\partial T}{\partial r} - n$ » для различных моментов времени (n – номер слоя по оси r) сечение на середине высоты области моделирования; размер одного слоя 0,0082 м; 240 – 11 мин; 360 – 16,7 мин; 480 – 22,3 мин; 540 – 25,1 мин.

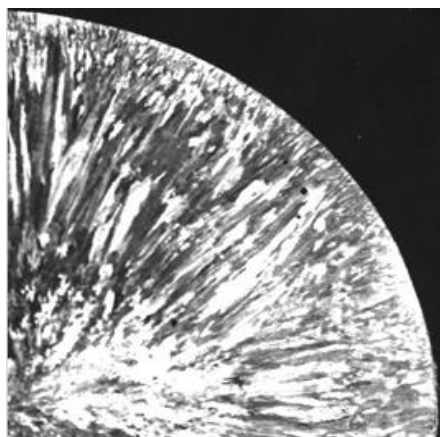


Рис. 4. Поперечный темплет круглого слитка диаметром 163 мм из сплава Л63, отлитого с использованием ЭМП: схема соединения обмоток – AZBXCY, направление поля относительно направления вытягивания слитка – «вверх», $A = 0,4813 \cdot 10^5$ А/м [1]

Проведенное исследование позволило установить количественную взаимосвязь между градиентом температурного поля и структурой металлического слитка.

Список использованных источников

1. Сарапулов С. Ф., Сокунов Б. А., Фризен В. Э. Индукционный перемешиватель алюминиевых сплавов в процессе кристаллизации // Вып. 38. Вестник УГТУ-УПИ. Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: Сб. статей. Ч. 2.: Специальные электрические машины и электромагнитные устройства. Вопросы энергосбережения. Образовательные проекты. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003. №5(25). С. 171–174.
2. Сидоров О. Ю., Семенов В. А., Сарапулов С. Ф. Конечно-разностное моделирование характеристик осесимметричного индукционного устройства // Изв. вузов. Электромеханика, 2001, №1. С. 32–35.
3. Сидоров О. Ю., Сарапулов Ф. Н., Сарапулов С. Ф. Метод конечных элементов и конечных разностей в электромеханике и электротехнологии. М.: Энергоатомиздат, 2010. 331 с.
4. Сидоров О. Ю., Сарапулов Ф. Н., Сокунов Б. А. Моделирование затвердевания расплава в электромагнитном кристаллизаторе // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий. АПЭЭТ-2014: сб. науч. трудов. Екатеринбург: УрФУ, 2014. С. 97–101.
5. Вайнгард У. Введение в физику кристаллизации металлов. М.: Мир, 1967. 167 с.